Rev. Écol. Biol. Sol, 1987, **24** (3) : 283-300.

Effets d'apports d'éléments minéraux sur le fonctionnement d'un écosystéme forestier dc l'Est de la France (*)

PAR

F. TOUTAIN *, A. DIAGNE * et F. LE TACON **

* *Centre de Pédologie Biologique, C.N.R.S., B.P. 5, Vandœuvre-lès-Nancy Cedex*
** *Station de Recherche sur le sol, la microbiologie et la nutrition des sols forestiers, INRA-CNRF, Champenoux, B.P. 35, 54280 Seichamps*

Synopsis: The effects of applying inorganic fertilizers (Ca alone or N, P, K, Ca) to a moder brown podzolic soil under an one hundread year old beech stand. After ten years, the humus type in the treatment having received N, P, K, Ca was a typical mull with earthworm and white rot activities, wih an increase in the humin content of the upper horizons and the station presented a clear improvement of the growth of the beech.

Keywords: Forest-ecosystem, fertilization, beech stand, earthworms, white rot fungi, humus, humification.

INTRODUCTION

Les types de végétation qui s'installent dans les forêts climaciques sont en équilibre avec les conditions climatiques et les caractéristiques physico-chimiques des roches-mères sous-jacentes. Ces végétaux captent de l'énergie solaire qu'ils transforment, grâce à l'assimilation chlorophyllienne, en biomasse végétale. Une partie de cette biomasse végétale va être incorporée au sol, y apportant ainsi une certaine quantité d'énergie qui va être utilisée par les microorganismes du sol dont l'activité va orienter la pédogenèse.

* Cette étude intégrant un grand nombre de disciplines, a été réalisée dans le cadre de l'A.T.P. PIREN-CNRS « Fonctionnement des écosystèmes forestiers ».

C'est au niveau de l'*humus*, ensemble de toutes les couches qui conti nent de la matière organique (litière + horizons organo-minéraux) qu'a l cette utilisation de l'énergie. Le résultat de cet apport énergétique abou en un *temps relativement long* (quelques centaines d'années en moyenne s nos climats tempérés), à l'installation d'un sol en équilibre avec l'ensem des conditions du milieu (climat, végétation, roche-mère) : c'est par définiti un sol climacique (DUCHAUFOUR, 1977) caractérisé par un humus spécifique.

Toute perturbation des conditions du milieu liées en particulier aux in ventions humaines (exploitations forestières, aménagements, apports dive provoque très rapidement des modifications dans le fonctionnement l'humus qui se matérialisent à la fois :

— dans la morphologie des couches humifères,

— dans la productivité végétale de l'écosystème.

De nombreux travaux ont démontré l'effet d'un apport d'éléments mi raux majeurs (azote, phosphore et potassium) ou d'un chaulage sur l'évolut de l'humus dans divers écosystèmes forestiers.

Il est possible par exemple par chaulage de transformer un moder mull (TAMM, 1974) ou d'améliorer l'activité biologique dans les n (DUCHAUFOUR et GUINAUDEAU, 1957 ; KRAPFENBAUER, 1962 ; CZERNEY, 1968).

Souvent d'ailleurs, un chaulage associé à une fertilisation azotée o une fertilisation complète a un effet plus favorable (FRANZ et LOUB, 19 SOUGNEZ et WEISSEN, 1977). Cette activation se traduit d'abord par une augm tation du nombre des bactéries et des actinomycètes et une diminution champignons (MAI et FIEDLER, 1972), puis par une augmentation de l'acti des lombrics (FRANZ et LOUB, 1959 ; LAATSCH, 1964 ; SPANNAGEL, 1960).

Ces transformations biologiques s'accompagnent de transformations miques : augmentation du pH, diminution de la quantité totale d'azote, ba du rapport C/N et augmentation de la production d'azote minéral (MA FIEDLER, 1972). L'augmentation de la minéralisation du carbone après c lage est plus importante que l'augmentation de la minéralisation de l'a (ULRICH et KEUFEL, 1970).

Selon HETSCH et ULRICH (1979) cette accélération de la minéralisatio l'azote après chaulage peut entraîner des pertes d'azote dans l'écosyst forestier.

A la suite d'un essai de fertilisation installé en forêt domaniale de Da (Vosges), nous avons pu observer de telles modifications du type d'humus

Nous avons, dans ce travail, essayé de préciser les diverses modificat microbiologiques et chimiques qui ont été induites par un chaulage ass ou non à une fertilisation complète.

I. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

A) La station d'étude.

1. *Les conditions de milieu.*

La forêt domaniale de Darney est située dans les Basses-Vosges (Est de la Fra entre 300 et 400 mètres d'altitude. La pluviosité est de 950 millimètres, assez régulière

parti (léger maximum en juillet-août et léger minimum en janvier-février-mars). La mpérature moyenne de juillet est de 18° C et celle de janvier de — 1,7° C.

La forêt de Darney s'établit sur le trias, du grès vosgien au Muschelkalk moyen. La traie étudiée s'étend essentiellement sur les affleurements du grès à voltzia et du grès termédiaire.

Les sols.

Les parcelles étudiées sont situées sur des affleurements de grès à voltzia et les sols nt la description est donnée figure 1 et les caractéristiques tableau I sont des sols bruns reux. La texture de ces sols est sablo-limoneuse, la teneur en matière organique est rte dans les horizons de surface, le pH est bas et les horizons sont nettement désaturés algré une nette mobilisation biologique des éléments dans l'horizon A_1.

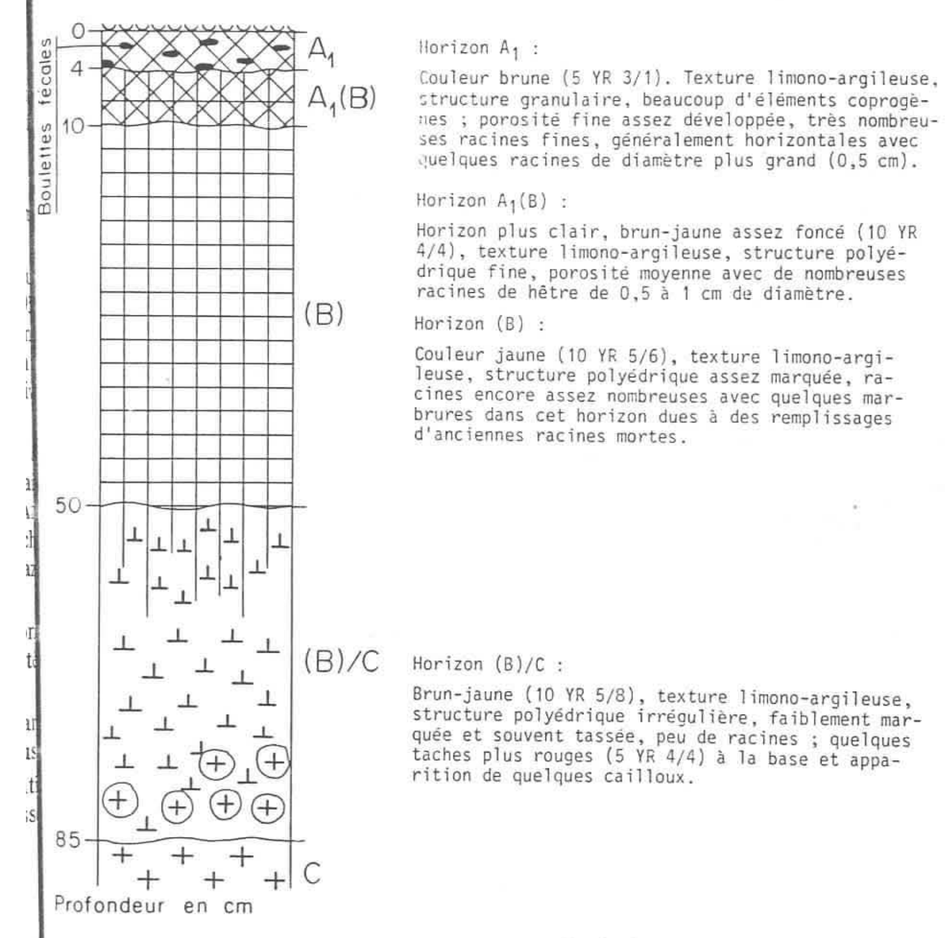


FIG. 1. — Schéma du profil témoin

Les réserves en eau utile de ces stations sont assez importantes en raison de leur rge non négligeable en limon et en argile et en raison de l'épaisseur du profil (plus mètre).

TAB. I

Caractéristiques analytiques du sol brun ocreux des parcelles de la forêt de Darney

Hor.	Prof. cm	pH eau	pH KCl	% SG	SF	LG	LF	A	C %	C/N	me/100 g Ca	Mg	K	S	T	S/T pH 7	S/T pH sol
A1	0-4	3,8	2,9	33,4	31,2	5,6	14,5	13,8	17,3	22,2	1,0	0,9	**1,1**	**3,3**	34,2	9,7	33
A1(B)	4-10	3,8	3,3	25,3	32,8	7,1	17,0	16,2			0,1	0,1	**0,3**	**0,6**	13,1	4,8	11
(B)	10-50	4,4	4,0	17,8	36,7	7,3	20,0	16,8			0,1	0,04	**0,1**	**0,3**	5,6	5,7	10
(B)/C	50-85	4,6	4,0	24,7	36,3	7,0	15,1	15,6			0,1	0,03	**0,1**	**0,3**	5,0	5,8	7

3. *Les peuplements végétaux.*

Le peuplement est issu d'une régénération naturelle (LE TACON et OSWALD, 1977). Il s'agit d'une futaie de hêtre *(Fagus silvatica)* âgée de 90 ans (+/— 10 ans), avec un faible mélange de chêne rouvre (*Quercus petraea* Liebl.). La hauteur dominante est en moyenne de 29,8 mètres : elle varie de 25,0 mètres à 32,9 mètres. D'après la table de production — éclaircie forte — de SCHOBER (SCHOBER, 1972), utilisable d'après LE GOFF (1974) dans le Nord-Est de la France, le peuplement se situe en moyenne dans la première classe de fertilité. Sur les parcelles d'essais, le nombre de tiges varie de 400 à 600/ha et la surface terrière est de l'ordre de 30 m^2/ha.

En ce qui concerne la végétation herbacée, la canche flexueuse *(Deschampsia flexuosa)* est dominante.

B) La fertilisation.

Rappelons que la fertilisation apportée dans la forêt de Darney a été envisagée à l'origine pour améliorer la fructification du hêtre et augmenter la production de graines dans les parcelles dont la régénération naturelle n'était de ce fait pas assurée (LE TACON et OSWALD, 1977).

Les parcelles retenues (1 parcelle témoin, 1 parcelle Ca_2 et 1 parcelle $NPKCa_1$) ont été choisies pour leur homogénéité pédologique. Initialement, les trois parcelles sous hêtraie étaient caractérisées par un sol brun ocreux à moder. Les engrais ont été épandus à l'aide d'un épandeur monté sur un tracteur. En dehors de la parcelle témoin qui n'a reçu aucun apport fertilisant, les traitements étudiés sont les suivants :

— Traitement Ca_2 :

1 500 kg de CaO à l'hectare sous forme de calcaire.

— Traitement $NPKCa_1$:

200 kg d'azote sous forme d'ammonitrate à 33 %.
150 kg de P_2O_5 sous forme de scories à 16 %.
675 kg de CaO apportés par les scories.
150 kg de K_2O sous forme de [illegible] à 50 %.

Le phosphore, le calcium et le potassium ont été apportés en surface, au cours de l'hiver 1971-1972 ; l'azote, par contre, a été apporté en deux fois :

— 100 kg au printemps 1972.

— 100 kg au printemps 1973.

La surface de chaque parcelle était de 40 × 40 m soit 16 ares.

C) Les prélèvements.

Les derniers prélèvements de litière, d'humus et de sol ont été faits selon le procédé général adopté par la station de recherche sur les sols, la microbiologie et la nutrition des arbres forestiers. (INRA, Nancy-Champenoux), avec prélèvement tous les 5 m sur une ligne orientée NW-SE en évitant les zones de végétation dense et en se plaçant à au moins 1,5 m du pied des arbres. Les 10 prélèvements sont ensuite mélangés en vue de réaliser un échantillon moyen représentatif. Les prélèvements et les analyses ont été faites, rappelons-le, 10 ans environ après la fertilisation.

D) Les méthodes d'étude.

1. *Observations morphologiques.*

Des échantillons d'humus prélevés avec le minimum de perturbations dans des boites métalliques sont mis à sécher au laboratoire puis sont inclus dans une résine dite d'inclusion. Lorsque le bloc a durci, une lame est coupée dans le bloc, elle est collée sur une lame de verre et usée sur un plateau diamanté jusqu'à l'obtention d'une épaisseur de 20 μ. Les lames sont observées à l'aide d'un microscope Wild M20 et d'une loupe binoculaire Reichert Wien.

2. *Analyses chimiques.*

a) Analyse élémentaire du carbone et de l'azote : analyses faites sur échantillons homogènes très finement broyés par combustion en four fermé à l'autoanalyseur Carlo Erba ou sur des échantillons liquides après évaporation par combustion en four ouvert au carmograph Wosthoff pour le carbone et par distillation au Kjeldahl pour l'azote.

b) Dosage des cations : dosage par absorption atomique à l'aide du dispositif Varian Techtron.

c) Fractionnement de la matière organique : le but du fractionnement de la matière organique est de regrouper dans les mêmes fractions, des matières organiques de même nature. Les différentes méthodes proposées pour les sols, dont celle de DUCHAUFOUR et JACQUIN (1966), présentent toutes des inconvénients et des limites de validité ; nous avons adopté celle de BRUCKERT *et al.* (1978), modifiée par BRUN (1978) dont les modalités sont les suivantes :

— Agitation préalable dans l'eau pendant 18 heures, en présence de billes d'agate (pour disperser les microagrégats), puis tamisage à 100 μ et 50 μ.

C'est dans la fraction inférieure à 50 μ que se rencontre l'essentiel de la partie humifiée du prélèvement, mais BRUN a montré que dans certains humus (humus de type moder ou dysmoder), il y avait beaucoup de débris végétaux peu transformés dans cette fraction. C'est pourquoi il est utile de pratiquer deux séparations densimétriques au bromoforme-alcool à d = 1,8. La première permet de séparer les petits fragments de feuilles et les boulettes fécales holorganiques *(matière organique fraîche)*, la seconde après agitation ultrasonique pendant 30 secondes, fait remonter *l'humine héritée* (boulettes fécales de collemboles et d'enchytraéides, alourdies par ingestion de grains de quartz). C'est sur le culot, appelé *matière organique liée* (matière organique lourde) que sont extraits les acides

alcalino-solubles (acides fulviques et acides humiques) ; le reste « matière organique inextractible », correspond à l'*humine d'insolubilisation* (il s'agit en fait de l'humine d'insolubilisation + humine microbienne, constituée de parois et résidus de la microflore).

3. *Étude de l'activité biologique.*

a) Minéralisation du carbone et de l'azote.

Les produits à incuber (horizons A_1 fraîchement prélevés) sont humidifiés à la capacité au champ. Ensuite ils sont mis dans des erlenmeyers plongés dans un bain-marie thermostaté à 20° C. Tous les deux jours, le CO_2 dégagé est balayé par un courant d'air (débarrassé au préalable de son CO_2 par barbotage dans la soude et piégé par de la soude N/10. Le dosage dans la soude est fait par HCl N/10, après précipitation des carbonates par $BaCl_2$. Chaque semaine, le contenu d'un erlen est utilisé pour le dosage de l'azote ammoniacal et nitrique, ce qui permet de connaître ainsi le taux de minéralisation de l'azote pour la période correspondante.

b) Inventaire des organismes vivants.

— Ces inventaires ont été faits en ce qui concerne la faune par GEOFFROY et MOLFETAS (1982) pour les macroarthropodes, ALBRECHT pour les enchytraéides et BOUCHÉ pour les lombriciens (comptage et répartition des espèces).

— En ce qui concerne les champignons supérieurs, l'inventaire a été fait par GARBAYE *et al.* (1979).

4. *Étude de la productivité forestière.*

Les mesures ont porté sur l'accroissement de la surface terrière des parcelles traitées et non traitées (la surface terrière d'un hectare de forêt représente la somme des surfaces de coupe de tous les arbres imaginés coupés à 1,3 m, elle est exprimée en m²/ha).

II. — RÉSULTATS

A) Morphologie et micromorphologie des humus de la parcelle témoin et des parcelles fertilisées.

La disparition lente ou rapide des débris foliaires (litières plus ou moins épaisses) est sous la dépendance des organismes qui vivent dans l'humus. Certains de ces organismes comme les vers de terre sont d'ailleurs responsables des liaisons qui existent au niveau des horizons supérieurs entre matière organique et matière minérale (BRUN, 1978). C'est en observant des différences dans les humus entre le sol témoin et les parcelles fertilisées que nous avons su, sur le terrain, que les engrais apportés avaient modifié de manière très sensible les modalités de recyclage de la matière organique du sol initial, en effet l'observation des lames d'humus des différentes parcelles met en évidence de nettes différences :

— Sur le sol, on constate dans les parcelles traitées (Ca_2 et $NPKCa_1$) l'existence de nombreux turricules de vers de terre anéciques, alors qu'il n'y en a que très peu dans le sol témoin. Le rôle de ces vers de terre dans la transformation des résidus végétaux est important (RAFIDISON, 1982). D'autre part, nous avons constaté de nombreuses traces d'activité de pourriture blanche sur la parcelle traitée avec apport de N, P, K et Ca_1 et, dans une moindre mesure, sur la parcelle n'ayant reçu que du calcium (Ca_2). Ces champignons sont très peu représentés dans le sol témoin où l'essentiel de l'activité fau-

nique semble surtout due aux enchytraéides et aux arthropodes qui sont très fréquents dans les humus de type moder (BRUN, 1978 ; TOUTAIN, 1981).

— Au niveau des litières, les couches de feuilles sont nettement plus épaisses dans le sol témoin que dans les parcelles fertilisées : tandis que dans le témoin le passage de la litière à l'horizon organo-minéral A_1 est progressif, dans Ca_2 et surtout dans $NPKCa_1$, ce passage est net et brutal ; ce caractère de continuité entre litières et horizon A_1 est caractéristique des humus de type moder (TOUTAIN, 1981) alors que la discontinuité nette qui existe entre les couches de feuilles et l'horizon A_1 correspond à une morphologie de type mull. Signalons enfin l'importance des racines mycorrhizées rencontrées dans le sol témoin et qui sont rares ou absentes (du moins à l'œil nu) dans les deux autres traitements.

La description morphologique des humus schématisée sur la figure 2 est la suivante :

1. *Parcelle témoin.*

L'ensemble des couches holorganiques a un développement de l'ordre de 4 à 5 cm ; la couche L (0-1 cm) est constituée de feuilles de couleur brune morphologiquement intactes et âgées de 2 ans au plus. Il n'y a que très peu de feuilles blanchies. Dans la couche F (2 cm), les feuilles sont légèrement morcelées et présentent à leur surface des boulettes fécales de couleur foncée (d'enchytraéides et microarthropodes) ; la cohérence entre les débris foliaires y est forte (présence de très nombreux filaments mycéliens, de racines de canche et de radicelles de hêtre mycorhizées).

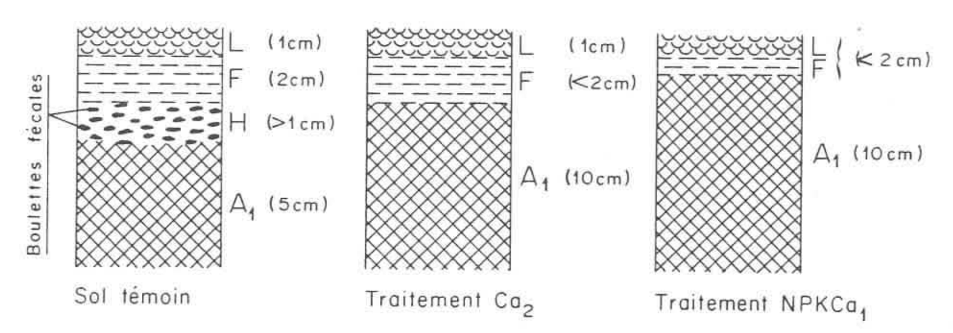


FIG. 2. — Schéma des humus

La couche H (1 cm) de faible cohérence, très riche en boulettes fécales et mycorhizes de hêtre, présente un passage insensible vers l'horizon A_1.

L'horizon A_1 (4 à 5 cm d'épaisseur), de couleur brune (5 YR 3/1), à texture limono-argileuse, à structure peu marquée est riche en boulettes fécales d'enchytraéides et de microarthropodes et en racines fines, généralement horizontales. Cet humus peut être qualifié de *moder*.

2. *Parcelle Ca_2.*

Les couches holorganiques ont au plus 3 cm d'épaisseur et présentent une morphologie très différente de celle de la parcelle témoin.

La couche L (1 cm environ) est constituée d'une sous-couche de feuilles brunes et d'une sous-couche de feuilles blanchies par les pourritures blanches se présentant en plaques fortement cohérentes. Les traces d'activité de vers de terre sont évidentes avec, en particulier, l'existence d'un grand nombre de débris foliaires de moins d'un cm et de nervures résiduelles (couches L_T, BRUN, 1978).

La couche F a moins de 2 cm d'épaisseur et sa couleur est noire (débris foliaires devenus foncés) ; cette couche est peu cohérente, les racines de canche flexueuse y sont nombreuses et les racines de hêtre sont mycorhizées ; elle est constituée de nombreux débris foliaires encore reconnaissables et d'une grande quantité de boulettes fécales (enchytraéides, microarthropodes, vers de terre).

L'horizon A_1 (10 cm environ) est composé d'un sous-horizon A_{11} (0-4 cm) noir (5 YR 2/1) limono-argileux, à structure irrégulière fortement influencée par les déjections de vers de terre (avec présence de nombreuses racines fines de graminées) et d'un sous-horizon A_{12} (4-10 cm) dans lequel l'imprégnation de matière organique est irrégulière et de couleur plus claire (5 YR 3/2) ; sa structure est plus massive et on y rencontre des racines de hêtre de 3 à 5 mm de diamètre.

Cet humus est intermédiaire entre les types mull et moder. Il s'agit d'un *mull-moder.*

3. *Parcelle $NPKCa_1$.*

L'humus de cette parcelle présente des caractères morphologiques très différents des précédents. La couche holorganique a 1 à 2 cm d'épaisseur ; elle est constituée d'une couche L de feuilles brunes mélangées à des feuilles blanchies (F) rarement entières. Cette fine couche de litière, ça et là recouverte de turricules de vers de terre, repose en discontinuité brutale sur l'horizon A_1 organo-minéral.

L'horizon A_1 a 10 cm d'épaisseur ; il est constitué d'un sous-horizon A_{11} de 4 cm d'épaisseur, de couleur assez foncée (10 YR 3/1), de texture limono-argileuse à assez forte porosité et d'une structure grumeleuse nettement marquée par l'existence de nombreuses déjections de vers de terre et de quelques racines de hêtre (3 mm de diamètre) et d'un sous-horizon A_{12} de 5 à 6 cm environ d'épaisseur, de couleur plus claire (10 YR 3/2) avec des marbrures très nettes dues à l'activité lombricienne ; ce sous-horizon a une structure peu marquée et une porosité assez forte, avec une abondance de traces d'activités animales (enchytraéides, microarthropodes, vers de terre).

Cet humus peut être *qualifié de mull acide* à forte activité de vers de terre et de pourritures blanches.

L'étude micromorphologique effectuée sur lames d'humus avec une méthode de comptages par points (BRUN, 1978) permet de mettre en évidence l'importance des activités fauniques dans les 3 humus étudiés : 50 % (en volume) des déjections d'animaux rencontrés dans le sol témoin (A_1) sont dus

aux enchytraéides, 21 % dans la parcelle Ca_2, 6 % dans la parcelle $NPKCa_1$, les déjections de vers de terre représentent par contre 5 % du volume de l'horizon A_1 de la parcelle témoin, 25 % dans la parcelle Ca_2 et 50 % dans la parcelle $NPKCa_1$, ce qui confirme et précise les observations faites *in situ*.

B) **Caractéristiques physico-chimiques des humus de la parcelle témoin et des parcelles fertilisées : valeurs des pH et des taux de saturation des horizons de surface.**

Les caractéristiques analytiques des horizons de surface des différentes parcelles sont données dans le tableau II.

Les chiffres reportés dans ce tableau permettent les remarques suivantes :

— La valeur du pH eau est particulièrement basse dans l'horizon A_1 de la parcelle témoin, elle est plus élevée dans la parcelle qui a reçu du calcaire, mais il faut noter que dans cette parcelle le pH eau de l'horizon A_1 a baissé en 2 ans d'une unité et demi. La différence (pH eau-pH KCl) est relativement élevée dans l'horizon A_1 de la parcelle ayant reçu $NPKCa_1$ (0,62). Ces valeurs sont à mettre en relation avec les valeurs de la capacité d'échange à pH 7 et avec les teneurs en Al^{+++} échangeable à ces pH acides.

TAB. II

Caractéristiques analytiques des horizons de surface des différentes parcelles

Hor.	Prof.	pH eau	pH KCP	me/100 g sol										
				Ca	Mg	K	S	H^-	Al^{+++}	Ac	T7	100 S/T7	Tsol	100 S/Tsol
T														
A1	0-4	3,8	2,9	1,0	0,9	1,1	3,3	1,3	4,9	6,2	34,2	9,7	10,0	33
A1(B)	4-10	3,8	3,3	0,1	0,1	0,3	0,6	0,4	4,6	5,0	13,1	4,8	6,0	11
Ca2														
A1	0-4	4,4	3,6	4,8	0,4	0,6	5,9	0,3	1,7	2,0	16,4	35	8,6	69
A1(B)	4-10	4,2	3,6	0,8	0,1	0,2	1,2	0,2	4,1	4,3	10,7	11,4	5,6	22
NPKCa1														
A1	0-4	3,9	3,3	2,4	0,3	0,4	3,1	0,4	2,4	2,8	13,5	23,3	6,8	47
A1(B)	4-10	4,1	3,7	0,5	0,1	0,2	0,9	0,2	3,6	3,8	8,3	10,4	4,9	18

— L'acidité totale liée à la quantité d'Al^{+++} échangeable et la quantité de protons H^+ est nettement plus élevée dans l'horizon A_1 de la parcelle témoin que dans les horizons fertilisés.

— La quantité de calcium échangeable est forte dans la parcelle ayant reçu du calcaire, moyenne dans la parcelle $NPKCa_1$ et faible dans la parcelle témoin.

— Le taux de saturation au pH du sol permet une bonne discrimination entre les horizons supérieurs des parcelles : 33 % dans la parcelle témoin, 69 % dans la parcelle ayant reçu du carbonate seul et 47 % dans la parcelle $NPKCa_1$.

L'apport d'éléments fertilisants a donc diminué l'acidité et augmenté le potentiel nutritif du sol initial par une remontée du taux de saturation du complexe absorbant. La capacité d'échange élevée de l'horizon A_1 de la parcelle témoin tient à la forte acidité organique des moder. La diminution de la quantité d'ions Mg^{++} et K^+ dans le complexe d'échange des horizons de surface des parcelles traitées traduit un phénomène de concurrence entre ces ions et l'ion Ca^{++} qui se substitue à eux.

C) Retombées biologiques annuelles dans la parcelle témoin et dans les parcelles fertilisées.

Nous verrons sur le tableau III comment se répartissent les retombées biologiques 10 ans après l'apport minéral.

La fertilisation minérale a donc contribué à augmenter la productivité foliaire d'une manière très significative dans le cas de la parcelle fertilisée en $N + P + K + Ca_1$ par rapport à la parcelle témoin (différence significative au risque de 1 ‰) mais d'une manière non significative dans le cas de la parcelle Ca_2.

TAB. III

Importance des retombées biologiques globales et des retombées de feuilles dans la parcelle témoin et dans les parcelles fertilisées en t/ha (poids sec à 40°)

Parcelle	Témoin	Ca2	NPKCa1
Retombées épigées globales...	3,80 t/ha ± 0,30	4,09 t/ha ± 0,35	5,46 t/ha ± 0,37
Retombées feuilles..........	3,20 t/ha ± 0,46	[illegible],50 t/ha ± 0,2	4,7 t/ha ± 0,3

1. *Caractéristiques pondérales et chimiques des feuilles.*

— Poids moyen d'une feuille ; des comptages faits sur 500 feuilles prélevées dans chaque parcelle montrent (Tab. IV) que si les différences de poids entre les feuilles prélevées dans les parcelles témoin et Ca_2 ne sont pas significativement différentes au seuil de 95 %, celles qui ont été observées entre les feuilles prélevées dans les parcelles témoin et fertilisées $NPKCa_1$ sont significativement différentes au seuil de 99 ‰.

— Poids moyen d'une unité de surface de feuille ; cette étude, faite sur des rondelles d'un cm^2 découpées dans les feuilles provenant des différentes parcelles met en évidence qu'il n'y a pas de différences significatives entre la densité des feuilles tombées dans les différentes parcelles.

— Surface moyenne des feuilles ; la surface moyenne des feuilles de la parcelle fertilisée $NPKCa_1$ est significativement plus grande que celles de la parcelle témoin (cf. TAB. IV).

Au total (Tab. IV), l'augmentation des retombées foliaires dans la parcelle fertilisée $NPKCa_1$ par rapport à la parcelle témoin (47 % en plus) est attribuable à une augmentation du nombre de feuilles (28 % en plus) et à une augmentation de la surface des feuilles (15 % en plus).

Quant à la composition des feuilles, les feuilles des parcelles fertilisées contiennent davantage de K (3,90 ‰ dans la parcelle $NPKCa_1$, 2,60 ‰ dans la parcelle Ca_2 et 1,90 dans la parcelle témoin) un peu plus de calcium et nettement moins de Mn (1,45 ‰ dans la parcelle $NPKCa_1$, 1,75 dans la parcelle Ca_2 et 2,20 dans la parcelle témoin).

TAB. IV

Principaux résultats concernant les retombées foliaires dans la parcelle témoin et les parcelles fertilisées

	Parcelle témoin	Parcelle Ca2	Parcelle NPKCa1
Retombées foliaires (t/ha)............	3,2	3,5	4,7
Poids moyen d'une feuille (en mg)......	87,8	92,8	100,8
Surface moyenne d'une feuille (en cm²).	17,0	17,9	19,5

D) **Activité biologique et humification.**

1. *Importance des horizons holorganiques et coefficient K de JENNY.*

Le poids des horizons holorganiques des différentes parcelles et les coefficients de JENNY correspondants se répartissaient en novembre 1982 comme indiqué sur le tableau V.

2. *Minéralisation globale du carbone et de l'azote.*

Les chiffres reportés dans le tableau VI mettent en évidence l'importance des minéralisations du carbone et de l'azote dans l'horizon A_1 de la parcelle $NPKCa_1$, le taux assez élevé de minéralisation nette de l'azote obtenu dans l'horizon A_1 de la parcelle Ca_2 (alors que le taux de minéralisation du carbone est faible dans cet horizon) et les faibles intensités de minéralisation du carbone et de l'azote dans l'horizon A_1 de la parcelle témoin.

TAB. V

Répartition du poids total de litière dans les différentes stations et coefficients de JENNY correspondants (K = 100 A/A + L, A étant le poids de retombées de feuilles) en novembre 1981

	Parcelle témoin	Parcelle Ca2	Parcelle NPKCa1
Poids de litière totale en t/ha..........	12,1	10,2	7,8
Coefficient de JENNY................	24	29	41

3. *Types d'activité biologique.*

Les comptages d'animaux effectués dans les stations confirment les observations faites en micromorphologie sur lames d'humus, à savoir que les vers de terre anéciques (et spécialement *Nicodrilus velox*) et épianéciques ont une forte activité dans les stations $NPKCa_1$ et Ca_2 (biomasse lombricienne de 350 kg/ha dans la parcelle $NPKCa_1$, de 130 kg dans la parcelle Ca_2 et seulement de 70 kg dans la parcelle témoin).

TAB. VI

Taux de minéralisation du carbone et de l'azote des horizons A1 (0-4 cm) des différentes parcelles au bout de 6 semaines d'incubation à 28° et à l'humidité équivalente

	Parcelle témoin	Parcelle Ca2	Parcelle NPKCa1
Taux de minéralisation du C (en % C total A1 0-4 cm)..................	1,3	1,7	3,0
Taux de minéralisation nette de l'azote (en % N total A1 0-4 cm)...........	1,2	6,1	8,6

Les études spécifiques faites sur les différents groupes animaux montrent que la diversité des animaux est grande dans la parcelle $NPKCa_1$ par rapport à celle qui existe dans la parcelle témoin. C'est le cas par exemple pour les

macroarthropodes. C'est le cas aussi pour les enchytraéides dont 70 % des individus appartiennent à l'espèce *Cognettia sphagnetorum* dans la parcelle témoin alors que dans la parcelle fertilisée par $NPKCa_1$, 8 espèces différentes ont été reconnues qui représentent chacune de l'ordre de 10 à 15 % de l'ensemble de ces oligochètes.

La répartition des champignons a été étudiée par GARBAYE *et al.* (1979) ; cette répartition montre que les apports minéraux enrichissent considérablement la diversité de la microflore fongique. Les fructifications de 8 espèces de champignons supérieurs (absentes sur la parcelle témoin) ont été ramassées dans les parcelles fertilisées (*Lepista inversa, Rhodopaxillus nudus* et *Clitocybe rivulosa* uniquement sur la parcelle fertilisée par $N + P + K + Ca_1$, *Hebeloma crustiliniforme, Collybia butyracea, Laccaria laccata, Lycoperdon gemmatum* et *Lycoperdon piriforme* uniquement sur la parcelle qui a reçu un apport de calcaire). Certains de ces champignons sont reconnus comme des champignons mycorhiziens, d'autres comme des pourritures blanches (*Collybia butyracea, Rhodopaxillus nudus,* par exemple).

D'autre part, les placeaux témoins et fertilisés présentent de nombreuses racines mycorhizées dans les 30 premiers cm du sol mais la structure même des humus s'étant modifiée, ces ectomycorhizes étudiées par GARBAYE se répartissent différemment dans le sol (Tab. VII) et présentent une morphologie variable.

TAB. VII

Nombre d'apex mycorhizés et poids de racines dans 1 m² de sol sur 30 cm d'épaisseur

Traitement	T	Ca2	N + P + K + Ca
Nbre d'apex mycorhizés.....	5,3 10^6	3,9 10^6	2,1 10^6
Poids de racines en g........	970	760	660
Nbre d'apex/g de racines.....	5,4 10^3	5,1 10^3	3,1 10^3

On constate ainsi que les apex mycorhizés se raréfient en surface et deviennent moins nombreux par unité de volume de sol dans les parcelles fertilisées (surtout dans les traitements N + P + K + Ca) que dans la parcelle témoin.

Dans la parcelle chaulée, le nombre total d'apex (tous mycorhizés) est plus faible que dans la parcelle témoin. Dans la parcelle fertilisée par NPKCa, le nombre total de mycorhizes par unité de volume et le nombre de mycorhizes rapporté à un même poids de racines sont nettement plus faibles que dans la parcelle témoin. On assiste d'autre part dans les parcelles fertilisées à une modification profonde de la distribution des différents types morphologiques de mycorhizes avec, en particulier dans la parcelle fertilisée par NPKCa, un effectif dominant de mycorhizes de type lisse reconnues

comme moins efficaces que les mycorhizes à mycélium externe abondant, proportionnellement plus fréquentes dans la parcelle témoin. Tout se passe comme si le peuplement forestier de la parcelle enrichie par NPKCa s'adaptait à la plus grande richesse minérale en restreignant l'ampleur et l'efficacité de ses systèmes racinaires.

4. *Fractionnement et caractéristiques de la matière organique.*

Les études de fractionnement et de caractérisation de la matière organique présente dans la partie supérieure des horizons A_1 (0-4 cm) permettent les remarques suivantes (cf. Tab. VIII) :

— La teneur moyenne en matière organique de l'horizon supérieur de la parcelle fertilisée par $NPKCa_1$ est nettement moins élevée que celle de la parcelle témoin (20 % contre 35 %), le rapport C/N de cette matière organique est aussi moins fort (18 contre 22). La teneur en matière organique de la parcelle Ca_2 a une valeur intermédiaire.

TAB. VIII

Fractionnement de la matière organique des horizons supérieurs des différentes placettes — taux d'humine en %

Parcelle	C	C/N	Fraction < 50 µ						
			Importance % C init.	MO liée % C < 50 µ	AF + AH	AF/AH	Humine % C < 50 µ	Humine % C init.	Soit humine t/ha
Témoin	17,3	22,2	22,7	47,0	11,8	0,9	35,2	8,0	1,6
Ca2	12	19,7	22,8	54,4	15,9	0,8	38,5	8,3	1,7
NPKCa1	10	18	26,8	73,4	24,5	0,8	48,9	12,8	3,2

— Si l'importance de la matière organique répartie dans la fraction < 50 µ reste du même ordre de grandeur, le taux de matière organique liée (carbone humifié) présente dans cette fraction varie fortement d'une parcelle à l'autre (47 % du carbone de la fraction < 50 µ dans la parcelle témoin, 54 % dans la parcelle $NPKCa_1$). Le taux d'extraction dans les réactifs alcalins de cette matière organique < 50 µ est plus élevé dans les parcelles fertilisées que dans la parcelle témoin.

— Exprimée en quantité par unité de surface (t/ha), l'importance de l'humine d'insolubilisation présente dans l'horizon A_1 de la parcelle fertilisée par $N + P + K + Ca_1$ est deux fois plus forte que celle présente dans la parcelle ayant reçu du calcaire. La présence de cette matière organique très réactive qui joue un rôle important dans la structure des sols et dans leur capacité d'échange permet de prévoir des variations de production forestière entre les parcelles.

E) **Productivité forestière des différentes parcelles.**

Diverses mesures de production forestière ont été faites sur ces parcelles depuis la fertilisation. Ces mesures ont porté sur les accroissements de surfaces terrières et ont été faites régulièrement jusqu'en 1978 (des mesures plus récentes ne sont pas encore dépouillées). Donc, 7 ans après ces apports, on constate que l'accroissement relatif en surface terrière (entre 1972 et 1978) avait augmenté :

de 17,7 % par rapport à celui du témoin dans la parcelle Ca_2,

de 37,5 % par rapport à celui du témoin dans la parcelle $NPKCa_1$.

En mai 1978, le gain annuel en accroissement relatif de surface terrière par rapport à celui de la parcelle témoin était :

de 27 % pour la parcelle chaulée,

de 72 % pour la parcelle qui a reçu l'apport complet $NPKCa_1$
chiffre tout à fait remarquable si l'on se rappelle surtout que les peuplements initiaux se situaient dans la première classe de fertilité.

III. — **CONCLUSION**

En conclusion, l'ensemble des études faites sur la forêt de Darney après fertilisation (Ca ou N + P + K + Ca) sous une futaie de hêtres âgées d'une centaine d'années apporte des renseignements particulièrement intéressants sur les modifications subies non seulement au niveau du sol et des humus mais aussi au niveau de la productivité forestière.

— Dans le cas des parcelles qui ont reçu un apport de calcaire seul, on constate assez rapidement des modifications dans le fonctionnement de l'humus par augmentation de l'activité lombricienne liée très probablement à l'apport d'ions Ca^{++} s'accompagnant de quelques modifications des caractéristiques de la matière organique, mais cet effet n'est pas stable et au bout de quelques années le pH des horizons de surface baisse de nouveau et l'humus retrouve un fonctionnement de moder.

— Dans le cas des parcelles fertilisées par NPKCa ont constate, par rapport à la parcelle témoin, que les activités biologiques du sol se sont modifiées, elles ne sont plus de même nature (activité dominante des vers de terre et des champignons de pourriture blanche dans les parcelles NPKCa, alors que dans la parcelle témoin, les activités dominantes étaient celles des enchytraéides et des microarthropodes). Il s'installe, de ce fait, un nouveau mode de fonctionnement de l'humus qui aboutit :

— à une transformation très rapide de l'humus vers le mull,

— à une transformation du système racinaire (avec une meilleure prospection de l'horizon A_1 et des modifications dans la répartition des types d'ectomycorhizes),

— à l'élaboration d'une plus grande quantité d'humine d'insolubilisation, matière organique à forte réactivité vis-à-vis des cations et des minéraux, d'où la constitution d'une meilleure structure et d'une plus forte capacité d'échange organo-minérale.

Il se crée alors de meilleures conditions d'alimentation pour les arbres qui provoquent une augmentation de la surface foliaire et par là même une meilleure productivité. Le fonctionnement même de l'écosystème s'en trouve profondément modifié.

Cette expérimentation réalisée dans la forêt de Darney représente un excellent exemple d'une activation biologique des sols liée à un apport minéral. Une activation peut être aussi obtenue par des interventions d'ordre mécanique (passage du rotovator par exemple, TOUTAIN, 1981) ou d'ordre sylvicole (ouverture du peuplement).

Ces diverses interventions modifient l'activité des organismes du sol et donc le fonctionnement de l'humus, puis du sol et par là même le fonctionnement de l'écosystème tout entier.

De nombreux dysfonctionnements d'écosystèmes forestiers sont régulièrement observés en Europe. Les causes primaires en sont diverses mais, le plus souvent, ces dysfonctionnements sont aggravés par le faible niveau de fertilité minérale des sols et par le ralentissement du cycle biologique, ce qui fragilise l'ensemble de l'écosystème.

RÉSUMÉ

Cette étude porte sur les modification morphologiques, chimiques et biologiques consécutives à un apport d'éléments minéraux fait sur un sol brun ocreux à moder développé sur grès à Voltzia sous une hêtraie d'une centaine d'années dans la forêt domaniale de Darney (Vosges). Les deux parcelles étudiées comparées à la parcelle témoin ont reçu, il y a 10 ans, l'une 1 500 kg de CaO/ha sous forme de calcaire broyé, l'autre 200 kg d'azote (ammonitrate à 33 %), 250 kg de P_2O_5 (scories à 16 %), 675 kg de CaO (scories) et 150 kg de K_2O (sulfate à 50 %).

Dix ans après ces apports minéraux, on constate qu'il y a eu une modification du type d'activité biologique dans les parcelles traitées et transformation du type d'humus avec — formation d'un véritable mull là où il y a eu apport de N + P + K + Ca — évolution du complexe argilo-humique — modification du type de matière organique (avec forte augmentation du taux d'humine) et de son turnover. Ces modifications se manifestent par une nette augmentation des productions foliaires et ligneuses (38 % d'augmentation des surfaces terrières en moyenne par an pendant les sept premières années qui ont suivi l'apport dans la parcelle ayant reçu N + P + K + Ca par rapport à la parcelle témoin).

Cette étude met en évidence le rôle des organismes édaphiques dans le fonctionnement des humus et des écosystèmes forestiers.

SUMMARY

The effects of applying inorganic fertilizers to a moder brown podzolic soil over sandstone (Voltzia series), and under an one hundred year old beech stand, were studied by following the morphological, chemical and biological changes.

There were three treatments: a control, addition of 1 500 kg CaO ha^{-1} as ground calcium carbonate, and a complete fertilization consisting of 200 kg N as ammonium nitrate, 250 kg P_2O_5 as slag, 675 kg CaO as slag, and 150 kg K_2O as postassium sulfate ha^{-1}.

During ten years there was an increase in earthworm activity linked with an increase in pH, in the treatment that had received calcium alone. However the basic humus type had changed little, having become a mull-moder.

The transformation of humus type was more evident in the treatment having received N, P, K, Ca, where it became a typical mull.

In the control soil enchytraeids and microarthropods activity was dominant but following complete fertilization this superceded by the activity of earthworms.

This was coupled with a change in the fungal population. White rot fungi (e.g. *Rhodopaxillus nudus*, etc.) which had not been found at the beginning of the experiment were the major class of fungi encountered in the litter after ten years.

These modifications have occurred together with a change in the type of humus, an increase in the humin content of the upper horizons and an increase, in the cation-exchange capacity of the soil.

The fertilizer treatments significantly improved the growth of the beach (17.7 % in the CaO treatment, and 35.5 % in the complete fertilizer treatment afer 7 years).

BIBLIOGRAPHIE

BRUCKERT (S.), ANDREUX (F.), CORREA (A.), AMBOUTA (K. J. M.) & SOUCHIER (B.), 1978. — Fractionnement des agrégats appliqué à l'analyse des complexes organo-minéraux de sols bruns et de chernozems. *Plant and Soil*, **57**: 271-295.

BRUN (J. J.), 1978. — *Étude de quelques humus forestiers aérés acides de l'Est de la France. Critères analytiques. Classification morphogénétique.* Thèse de Doctorat de Spécialité, Université de Nancy I, 118 p.

CZERNEY (P.), 1968. — Über den Einfluss der Kalkdüngung auf die chemischen Eigenschaften von Fichtenhumus. *Arch. Forstwes.*, **17**: 513-530.

DUCHAUFOUR (Ph.), 1977. — *Pédologie. Pédogenèse et classification.* Masson, Paris, 469 p.

DUCHAUFOUR (Ph.) & GUINAUDEAU (J.), 1957. — Une expérience de chaulage sur humus brut. *Ann. E.N.E.F. et Stat. Rech. et Exp.*, **15**: 335-364.

DUCHAUFOUR (Ph.) & JACQUIN (F.), 1966. — Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. *Bull. E.N.S.A.N.*, **8**.

FRANZ (H.) & LOUB (W.), 1959. — Bodenbiologische Untersuchungen on Walddüngungsversuchen. *Cbl. Ges. Forstw.*, **76**: 129-162.

GARBAYE (J.), KABRE (A.), LE TACON (F.), MOUSAIN (D.) & PIOU (D.), 1979. — Fertilisation minérale et fructification des champignons supérieurs en hêtraie. *Ann. Sci. Forest.*, **36**: 151-164.

GEOFFROY (J. J.) & MOLFETAS (S.), 1982. — *Effets de l'enrichissement de sols forestiers en éléments majeurs sur la structure fonctionnelle des peuplements de macroarthropodes.* Rapport d'activité A.T.P. « Fonctionnement des écosystèmes forestiers ».

HETSCH (W.) & ULRICH (B.), 1979. — Die langfristige Auswirkung von Kalkung. *Bodenbeasbeitung und Lupinenanbau auf die Bioelementvorrate zweier Flottsandstanderte im FA syke*, **98**: 237-244.

KRAPFENBAUER (A.), 1962. — Ergebnisse eines Düngungsversuches zur Umwandlung ungünsliger Rohhumusauflagen in einem Strohenbestand im Kobernauserwald. *Allgemeine Forstzeitung*, **23-24**: 275-278.

LAATSCH (W.), 1964. — Der Aufban fruchtbarer Waldböben. *Mitteilungen aus der Staatsforstverwaltung Bayern*, **34**: 274-286.

LE GOFF, 1974. — *La croissance du hêtre en France : utilisation possible des tables de production étrangères pour suivre l'évolution des peuplements.* INRA-CNRF, Station Sylviculture et Production. Document interne n° 74/3, 73 p.

LE TACON (F.) & OSWALD (H.), 1976. — Influence de la fertilisation minérale sur la fructification du hêtre *(Fagus silvatica)*. *Ann. Sci. Forest.*, **34**: 89-109.

MAI (N. H.) & FIEDLER (H. J.), 1972. — Bodenmikobiologische Untersuchungen an einem Düngungsversuch zu Fichtenroh humus in Thüringerwald. *Zentralbl. Bakteriol. Parasitenkunde Infektionskanheiten Hyg.*, **127**: 618-631.

RAFIDISON (Z.), 1982. — *Rôle de la faune dans l'humification : transformation des feuilles de hêtre par un ver anécique (Nicodrilus velox).* Thèse de Doctorat de Spécialité, Université de Nancy I, 104 p.

SCHOBER (R.), 1972. — *Die Rotbuche*. J.D. Sauerländers Verlag. Frankfurt a. M. ; 333 p.

SOUGNEZ (N.), WEISSEN (F.), 1977. — Évolution de la couverture morte et de la couverture vivante après fumure en vieille forêt d'épicéa commun. *Bull. Rech. Agr., Gemboux*, **12**: 233-247.

SPANNAGEL (G.), 1960. — *Humus formation under the influence of lime in conection with the development of a rich soil fauna. In* : 7 Congr. Intern. Soc. Soil Science, Madison, USA (summary), p. 96.

TAMM (C. O.), 1974. — Kalkproblement för jord, skog öch miljövard. *Ann. Acad. Royale d'Agric. Sylv. de Suède*, **113**: 37-43.

TOUTAIN (F.), 1981. — Les humus forestiers, structures et modes de fonctionnement. *Rev. Forest. Fr.*, **XXXIII**: 449-447.

ULRICH (B.) & KEUFEL (W.), 1970. — Auswirkungen einer Bestandeskaltung zu Fichte auf den Nährstoffaushalt der Bodens. *Forstarchiv.*, **41**: 30-35.